

合成開口レーダ画像再生処理におけるパラメータ推定方法の改良

國藤伴典*, 伊藤陽介**

人工衛星に搭載された合成開口レーダ(SAR)を用いることで広範囲の地球環境を気象条件や観測時刻に影響されにくく観測できる。そのため地球環境問題の深刻化とともに SAR の重要性は高まっている。レンジドップラー法による SAR 画像再生処理で用いられるパラメータのうち SAR と観測点間距離の時間的変化によって生じるドップラー周波数の精度は、再生画像の品質に影響する。ドップラー周波数の定数項であるドップラーセンタ周波数は SAR の姿勢情報と軌道情報から高精度で求めることができない場合が多いため、SAR によって観測された生データから DELTA E 法を用いてドップラーセンタ周波数を推定する。本論文では DELTA E 法を適用した領域において異常な値に推定されないように条件判断処理を加える改良方法を提案するとともに、ALOS PALSAR によって観測された SAR データを対象としてドップラーセンタ周波数を推定した結果を示す。

[キーワード: 合成開口レーダ, レンジドップラー法, ドップラーセンタ周波数, DELTA E 法]

1. はじめに

合成開口レーダ(SAR)は、波長3cm~80cm程度の電磁波をアンテナから放射し、地表面で散乱した電磁波のうち、再びアンテナに戻る後方散乱波を観測し、合成開口処理を行い高解像度化するセンサである。人工衛星に搭載されたSARを用いることで広範囲の地球環境を気象条件や観測時刻に影響されにくく観測できる。そのため地球環境問題の深刻化とともにSARの重要性は高まっている。

SARによって取得された生データを合成開口処理する方法はほぼ確立されているが、視覚的な側面から画像再生処理方法を理解することは難しかった。そのため、筆者らは教育用に特化したSAR画像処理システムを研究開発している^[1]。しかし、前記システムにおいて画像再生処理するためのパラメータの一部の推定処理が含まれていないという問題があった。本論文では、SARによって観測された生データをレンジドップラー法を用いて画像再生処理する場合に必要なパラメータとしてドップラーセンタ周波数に着目し、その推定方法と改良点について述べる。

2. レンジドップラー法の概要

レンジドップラー法によるSAR画像再生処理の流れは以下のとおりである^[2,3]。このとき、アンテナの進む方向をアジマス方向、電磁波の照射方向をレンジ方向と呼ぶ。

2.1 パラメータの取得

SARの仕様と軌道情報に基づいて画像再生処理に必要なパラメータとしてセンサの移動速度、レンジ距離、パルス繰り返し周波数(PRF)などを配布されたSARデータに記録された情報から取得する。

2.2 ドップラー周波数の推定

SARと観測点間距離の時間的変化によってドップラー効果が生じる。ドップラー効果による周波数の変化をドップラー周波数と呼ぶ。アジマス方向を高分解能化するための処理ではドップラー周波数を用いたフィルタリングを適用する。高品質な画像を再生するために正確なドップラー周波数を推定する必要がある。

ドップラー周波数を一次式で近似する場合、その定数項をドップラーセンタ周波数 f_{DC} 、一次項の係数をドップラー周波数変化率 f_{DR} とする。 f_{DC} は、アンテナから放射される電磁波の方向に依存するが、その方向をSARの姿勢情報と軌道情報から高精度で求めることは一般に困難である。そのため、 f_{DC} の推定では生データを用いる。また、 f_{DC} はレンジ距離によっても変化するため一定のレンジ距離間隔ごとに推定する必要がある。一方、アジマス方向における f_{DC} の変化は相対的に小さいが、長距離観測を考慮し両方向を変数とする f_{DC} を推定する。

* 鳴門教育大学 大学院(修士課程) 教科・領域教育専攻 生活・健康系コース(技術・工業・情報)

** 鳴門教育大学 大学院 自然・生活系教育部

なお、十分な精度を持つ軌道情報が与えられ、かつ精度よく f_{DC} を推定できた場合、 f_{DR} は式(1)を用いて計算できる。

$$f_{DR} = -\frac{2V_e^2}{\lambda R_0} \quad (1)$$

ここで、 λ は波長、 R_0 はレンジの距離、 V_e は有効速度である。

2.3 レンジ圧縮

SARはチャープパルスを送信し観測領域からの後方散乱波を受信処理後、生データとして記録する。レンジ圧縮ではレンジ方向にチャープパルスから得られる参照関数を生データに畳み込み演算し高分解能化する。

2.4 アジマス圧縮

ドップラー周波数を線形関数に近似し、レンジ圧縮と同様の処理をアジマス方向に適用することで高分解能化する。この処理をアジマス圧縮と呼び、アジマス方向の分解能はレンジ距離によらずアンテナ横幅の約半分となる。

3. DELTA E 法

近年、地球の自転に起因するドップラーセンタ周波数を相殺し、その周波数をほぼ0[Hz]近くに保つことが可能なヨーステアリング・モードを持つSARセンサが一般的に利用されている。ここでは、ヨーステアリング・モードで観測されたSARデータのみを取り扱うこととし、以降ドップラーセンタ周波数に PRF のあいまい度を含まないと仮定して述べる。

ドップラーセンタ周波数 f_{DC} はアジマス方向にフーリエ変換を行い最大となるパワースペクトルに対応する周波数である。ここでは周波数領域において効率的に推定を行うためDELTA E法を用いる^[4]。

3.1 アジマス方向のパワースペクトル

アジマス方向にフーリエ変換を行うとパワースペクトルを得ることができる。本節では、このアジマス方向の生データを PRF でサンプリングされたデジタル信号とする。

しかし、アジマス方向の1ライン分のパワースペクトルは図1のように大きく揺らいだ振幅特性となっているため、最大となるパワースペクトルに対応する周波数を推定できない。そこでレンジ方向に隣接するパワースペクトルを平均化し、図2のように揺らぎの少ないパワースペクトルを求めドップラーセンタ周波数の推定処理に用いる。

3.2 エネルギー比

図3に示すように特定の周波数 f_s に対して、その高域側と低域側に同じバンド幅 Δf の領域をとり、それぞれのパワースペクトルを式(2)、(3)を用いて積分する。高域側を E_1 、低域側を E_2 とし、式(4)によってエネルギー比 ΔE を求める。 f_s を $-PRF/2$ から $PRF/2$ まで変化させていき ΔE の周波数 f_s に対する関数を求める。

$$E_1 = \int_{f_s}^{f_s + \Delta f} p(f) df \quad (2)$$

$$E_2 = \int_{f_s - \Delta f}^{f_s} p(f) df \quad (3)$$

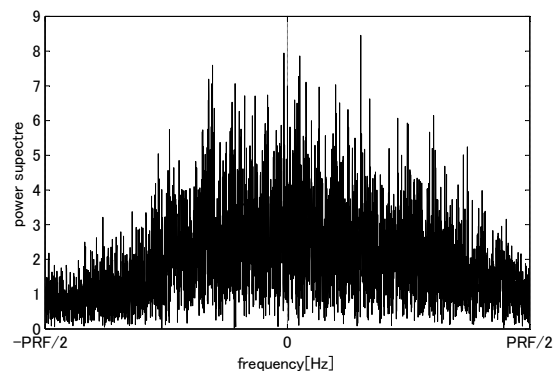


図1 1ラインのパワースペクトル

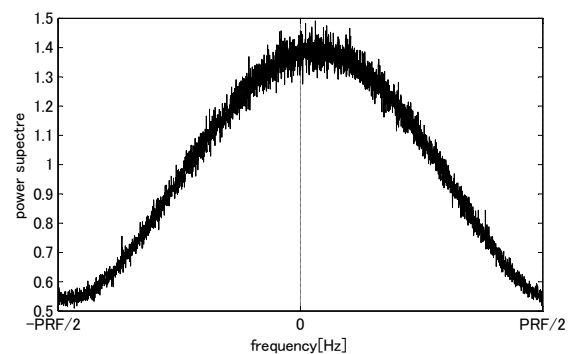


図2 平均化したパワースペクトル

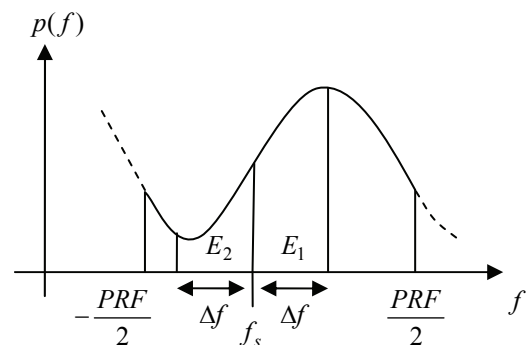


図3 DELTA E 法における積分範囲

$$\Delta E = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2} \quad (4)$$

3.3 ドップラーセンタ周波数の推定

$p(f)$ が極大値の近傍において対称である場合、その領域における ΔE は、ほぼ線形となり ΔE が 0 となる周波数 f_s が存在する。その周波数をドップラーセンタ周波数 f_{DC} と推定する。

4. DELTA E 法の問題点とその改良

DELTA E法を用いて推定されたドップラーセンタ周波数の値は、適用する領域の後方散乱状態に大きく依存する。ここでは、その問題点を明らかにするとともにDELTA E法を改良する。

4.1 パワースペクトルの極小値による問題点

$\Delta E = 0$ となる周波数を求める場合、図4の中央部分の最大の点だけではなく図4の左下に示す領域Mに含まれる極小値の点も ΔE の値が0になってしまう。この問題点を回避するため、パワースペクトルの平均値 \bar{p} を求め平均値以上の周波数領域である f_1 から f_2 の間でのみ ΔE を求め、ドップラーセンタ周波数を推定する。

4.2 後方散乱の差によって生じる問題点

後方散乱が一様に小さい水域 (図5 (a) のR1) や、後方散乱が一様に大きい陸地 (図5 (a) のR3) などでは図5 (b) 及び(d) のように単峰性のパワースペクトルの形状を得ることができ、4.1に述べた方法を適用することでドップラーセンタ周波数を推定できる。

しかし、後方散乱の小さい水域などと後方散乱の大きい陸地などが混在する (図5 (a) のR2) のような領域では、図5(c) に示すように両者のパワースペクトルが混じり合

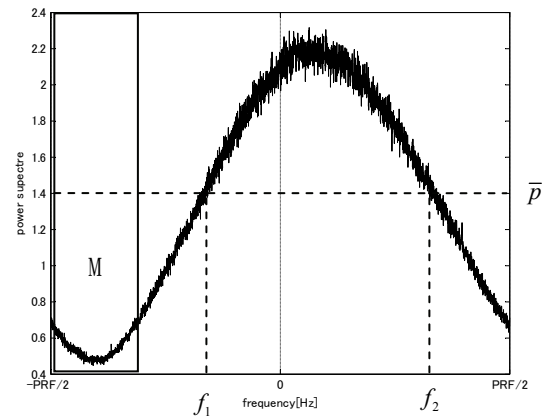
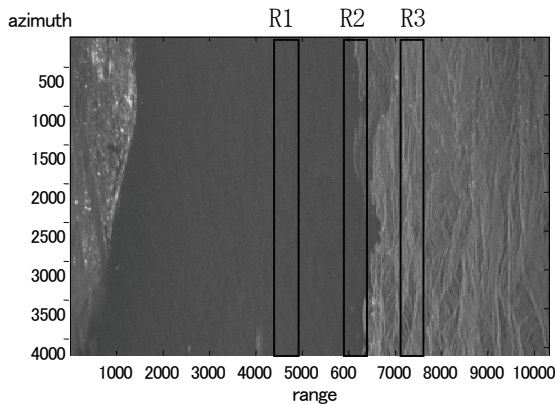
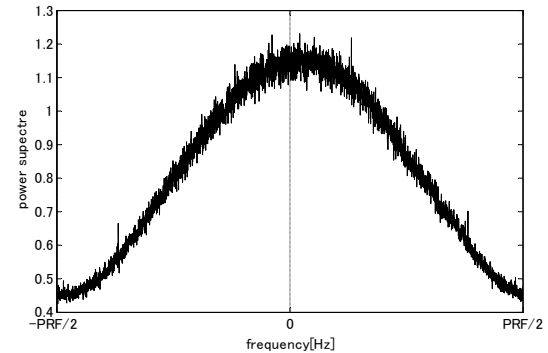


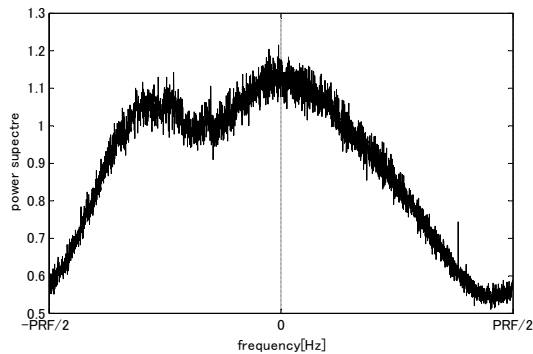
図4 パワースペクトルの極小値による問題点



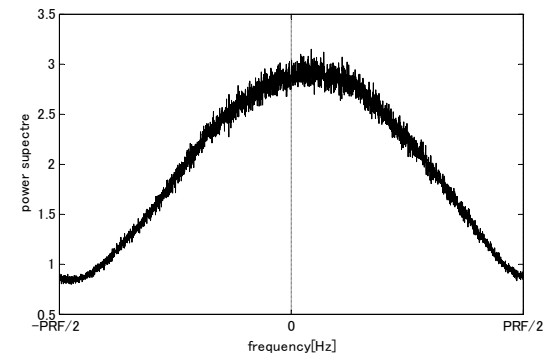
(a) SAR データ (人工衛星 ALOS, センサ PALSAR, シーン ID: ALPSRP150170690)



(b) R1 のパワースペクトル



(c) R2 のパワースペクトル



(d) R3 のパワースペクトル

図5 パワースペクトルの形状と観測領域の関係

い双峰性となる。そのため、DELTA E法を適用すると $\Delta E = 0$ となる周波数が複数推定されドップラーセンタ周波数を一つに特定できない。この問題点を回避するためDELTA E法を適用すべきでない領域を判定する方法を提案する。

図6にレンジ方向に対するパワースペクトルの平均値と地表面の関係を示す。後方散乱の大きい陸地と少ない水域が混在する領域(図6のR4及R5)ではパワースペクトルの平均値が大きく変化している。そこで、この混在する領域ではDELTA E法の適用を行わないようにするためパワースペクトルの平均値Pに対して閾値L1とL2を設け、 $L1 \leq P \leq L2$ の範囲に含まれる領域はドップラーセンタ周波数の推定を行わないようにする。

4.3 後方散乱の小さい領域での問題点

パワースペクトルの平均値が小さい領域では島や波浪などから発生する小さな後方散乱であってもパワースペクトルに影響を与える場合がある。図7に示すような特異な形状のパワースペクトルとなりDELTA E法を適用できない。このような領域のパワースペクトルの平均値は、周囲にある後方散乱の小さい水域とほとんど変わらない場合があり、4.2で述べた方法では、ドップラーセンタ周波数を推定すべきではない領域と判定できない。

そのため本研究では ΔE の形状に着目し、前記問題点を検出する方法を提案する。図8の横軸に周波数 f_s 、縦軸に ΔE の値をとったグラフを示す。実線が ΔE の値、

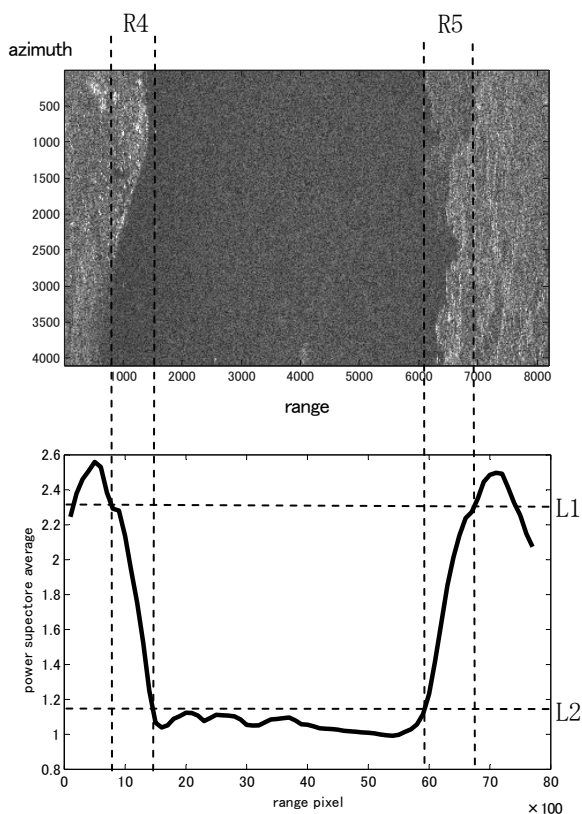


図6 パワースペクトルの平均値と地表面の関係

点線が ΔE から推定された回帰直線である。図8(a)は単峰性のパワースペクトルから作成した ΔE とその回帰直線であり、両者はほぼ重なり残差は小さい。一方、図8(b)は図7(b)に示すような特異な形状のパワースペクトルから作成した ΔE とその回帰直線である。図8(a)と比較して残差が大きくなっている。そこで、DELTA E法を用い回帰直線を推定した後、 ΔE の値と回帰直線との残差の二

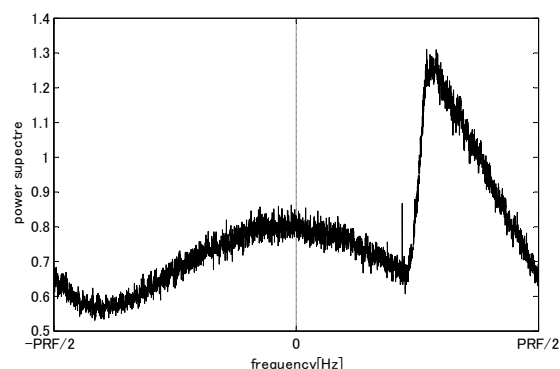
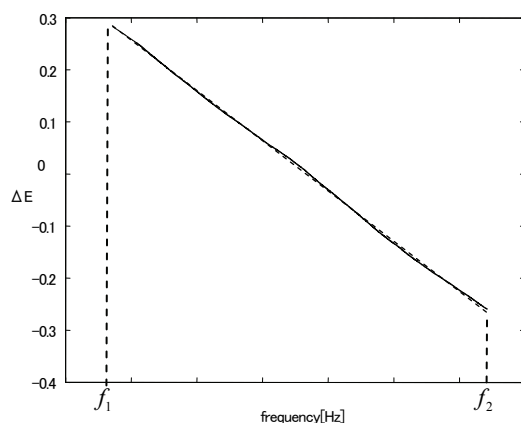
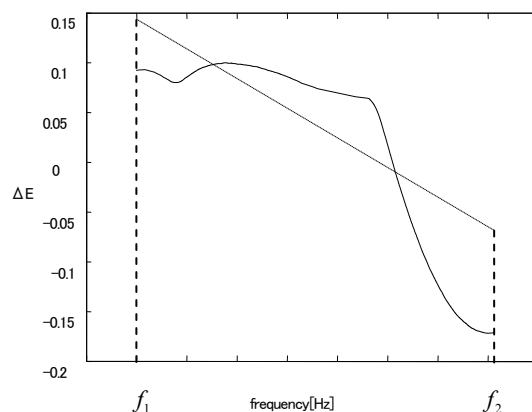


図7 異常なパワースペクトルの形状例



(a) 正常なパワースペクトルにおける ΔE



(b) 異常な形状のパワースペクトルにおける ΔE

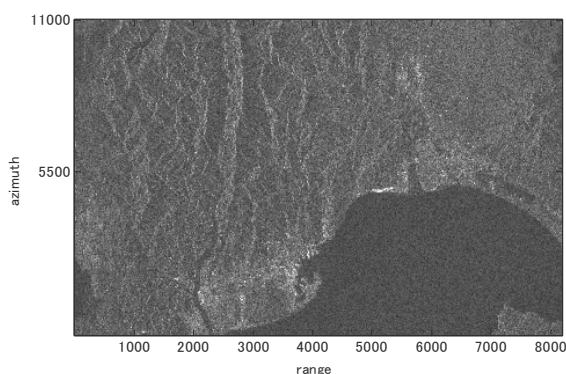
図8 ΔE に対する回帰直線と残差

乗和を求め、その値があらかじめ設定した値よりも大きければ当該領域のパワースペクトルは単峰性でないものと判断しドップラーセンタ周波数の推定を行わないようにする。

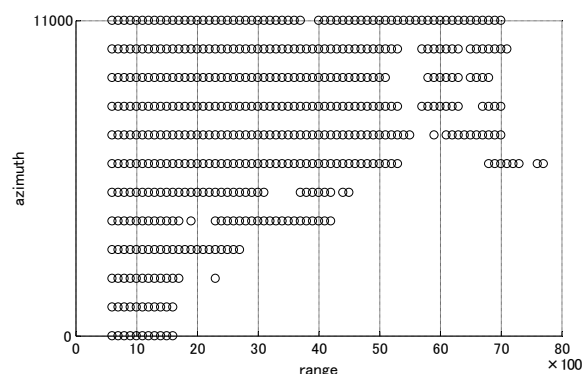
5. ドップラーセンタ周波数の推定結果

本節では、DELTA E法の問題点を回避するための4.1から4.3に述べた改良方法を適用し、SARデータ(人工衛星ALOS, センサPALSAR, シーンID: ALPSRP150170690)のドップラーセンタ周波数を推定した結果を示す。ヨーステアリング・モードで正常に運用されているPALSARで取得されたSARデータの場合、ドップラーセンタ周波数の絶対値は0に近い値のため、ここではPRFのあいまい度を考慮しない。DELTA E法を適用した範囲領域の大きさは、アジマス方向に4096点、レンジ方向に512点である。この単位領域を、レンジ方向に100点、アジマス方向には1000点ずつシフトして推定を行った。

図9に地表面の状態とドップラーセンタ周波数の推定を行った領域の対応を示す。図9(b)において○は、DELTA E法を用いてドップラーセンタ周波数を推定可能と判断された領域を示す。図9(a)において水域と陸地が混在する海岸線領域の領域は、図9(b)では推定を行わなかったこ



(a) SARデータ(人工衛星ALOS, センサPALSAR, シーンID: ALPSRP150170690)



(b) ドップラーセンタ周波数の推定領域

図9 ドップラーセンタ周波数の推定領域と地表面の関係

とがわかる。

図10は横軸にレンジ点番号、縦軸にドップラーセンタ周波数 f_{DC} をとった散布図である。推定値の回帰直線として $f_{DC} = 0.00394 r + 41.5 [\text{Hz}]$ が得られた。ここで、 r はレンジ方向の点番号である。この推定結果を用いて画像再生し良好なSAR画像を得ることができた。

6. まとめ

本論文では、SARによって観測された生データを処理するために必要なパラメータであるドップラーセンタ周波数を推定するためにDELTA E法を適用した。DELTA E法にパワースペクトルの形状に応じた条件処理を追加することで異常な推定値を得ないように改良した。この方法をALOS PALSARデータに適用した結果、推定できない領域を適切に判断していることが明らかとなるとともに、レンジ方向に対して線形的に変化するドップラーセンタ周波数を推定できた。

本方法で推定したドップラーセンタ周波数をSAR画像処理システムで運用しているデータベースに登録し、教育的な利用も予定している。

今後の課題として、ヨーステアリング・モードを備えていないSARセンサに対応するためにドップラーセンタ周波数のPRF分のあいまい度を確定する方法を追加しなければならない。さらに、ドップラーセンタ周波数の精度評価方法を研究する必要がある。

謝辞

本研究では(財)リモート・センシング技術センターにおいてサンプルとして提供されているALOS PALSARデータを利用させていただいた。

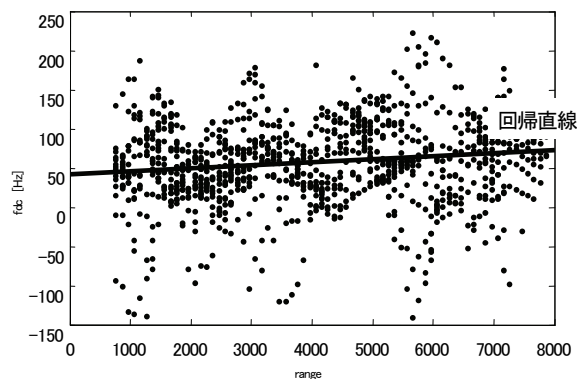


図10 ドップラーセンタ周波数の推定結果

参考文献

- [1] 寺本雄平, 伊藤陽介, 阿部健治: 教育用合成開口レーダ画像処理 Web アプリケーション・システム, 電気学会論文誌, Vol. 129-C, No. 9, pp. 1759-1767, 2009.
- [2] 飯坂譲二: 合成開口レーダ画像ハンドブック, 朝倉書店, pp. 42-56, 1998.
- [3] 國藤伴典, 伊藤陽介: インタプリタ形式データ処理用プログラム言語による合成開口レーダ画像再生処理, 日本産業技術教育学会第 26 回四国支部大会講演要旨集, p. 6, 2010.
- [4] S. N. Madsen: Estimating the Doppler centroid of SAR data, IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-25, No. 2, pp. 134-140, 1989.